

ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE DA GERAÇÃO EÓLICA E FOTOVOLTAICA NO ESTADO DA BAHIA

Christiane Karla Bispo da Costa – christiane.costa@ufob.edu.br

Stefania de Oliveira Silva

Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa

Resumo. Um dos desafios no uso de energias renováveis é falta de previsão dos recursos naturais que só produzem em condições ambientais propícias. Uma solução para este problema, é a combinação de fontes renováveis, de tal maneira, que as gerações tendem a potencializar gerando um desenlace propício durante o ano. Mas para isso, é necessário analisar as fontes, a fim de encontrar os sistemas que se complementam de forma eficiente. Considerando o crescimento das usinas eólicas e fotovoltaicas, este estudo foca na análise da correlação das duas fontes de energia diante das características que se relacionam tanto em termos mensais, quanto horários. Além disso, torna-se necessário visualizar as flutuações dessas fontes ao longo do dia e do ano. Foram coletados conjuntamente ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) dados reais de potência e fator de capacidade de dois conjuntos eólicos e de dois conjuntos fotovoltaicos durante o período de 2020 a 2022, sendo eles BJJ Solar, Sertão Solar Barreiras, Brotas de Macaúbas e Morro do Chapéu Sul. As análises são compostas por duas etapas, sendo que a primeira tem o intuito de visualizar o perfil de geração eólica e fotovoltaica ao longo do período dos dados coletados e o segunda analisa a complementaridade horária entre as fontes por meio de gráficos e cálculos estatísticos como o Coeficiente de Correlação de Person (CCP). Os cálculos indicaram uma associação negativa entre os conjuntos, sugerindo complementaridade entre as energias, eólica e fotovoltaica. Os CCPs mensais, variaram de -0,7 a -0,8, demonstrando paralelismo, em que o aumento da geração de uma fonte resulta na atenuação da outra, para no fim obter uma geração de energia mais estável e confiável.

Palavras-chave: Complementaridade, Fotovoltaica, Eólica.

1. INTRODUÇÃO

A queima de combustíveis fósseis foi uma das principais fontes de energia para a geração de energia. Contudo, ela está cada vez mais associada ao aquecimento global devido à emissão de gases de efeito estufa. Por essa razão, as fontes de energias renováveis estão crescendo em ritmo acelerado, pois aproveitam as forças naturais para criar uma alternativa, de tal maneira que não produz resíduos e não requer despesas e/ou investimentos com matéria-prima (REZENDE, 2020).

No território brasileiro, existe um desafio de implementar uma infraestrutura energética capaz de atender de maneira eficaz e eficiente todas as demandas regionais. A matriz elétrica do país tem como principal produção a geração hidroelétrica. No entanto, com as mudanças climáticas, a crise hídrica, que têm se tornado cada vez mais frequente, vem impactando diretamente a capacidade da geração (REZENDE, 2020). Diante deste cenário, a busca por alternativas energéticas provenientes de fontes renováveis, como a energia solar e eólica, tem ganhado força. A diversificação da matriz elétrica brasileira é vista como uma estratégia para garantir a segurança energética do país frente aos desafios impostos pelos problemas ambientais (RELVA, 2017).

Ao levar em consideração o crescimento das fontes energéticas renováveis, a matriz elétrica brasileira em 2022, conta com uma composição de 4,4% de energia solar e 11,8% de energia eólica. Grande parte da geração solar provém da Geração Distribuída (GD), que são sistemas de mini e microgeração instalados em residências e estabelecimentos comerciais (EPE, 2022a). Diante do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 (EPE, 2022b), a projeção para o Cenário de Referência revela o aumento dessas fontes renováveis. A Fig. 1, apresenta a projeção das fontes, eólica e solar.

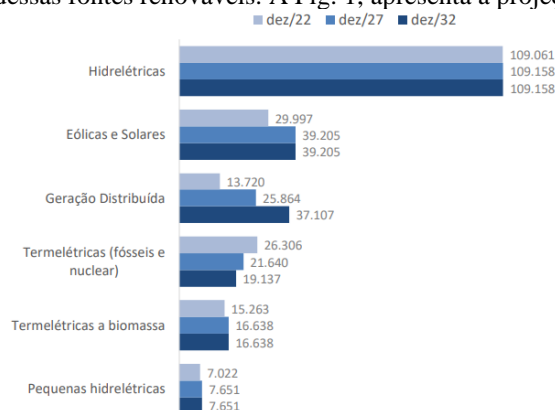


Figura 1 - Evolução da capacidade instalada existente e contratada do SIN.

Um dos obstáculos no uso das energias renováveis, está na dificuldade de previsão, pois os recursos naturais não estão sempre disponíveis e só produzem em condições ambientais favoráveis. Uma solução para isto é a hibridização das fontes energéticas. O propósito desta técnica, é que ambas as fontes atuem de forma correlata, ou seja, no momento em que uma fonte não está em condições ideais para geração de energia, a outra está em atividade de atuação. Para que isso ocorra de maneira eficaz, é necessário analisar as fontes, a fim de encontrar os sistemas que se complementam de forma eficiente.

Ao considerar o crescimento das usinas eólicas e fotovoltaicas, este estudo foca na análise da complementaridade entre as usinas eólico-fotovoltaicas para avaliar se ambas apresentam características mútuas tanto em termos mensais quanto horários, além de visualizar as flutuações dessas fontes ao longo do dia e do ano.

2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Os módulos fotovoltaicos são compostos por materiais semicondutores como o silício, possuem a habilidade de converter a radiação solar em eletricidade (MONTEIRO, 2018).

A quantidade de energia gerada está diretamente relacionada à radiação solar que incide sobre os módulos. Essa radiação atinge a superfície terrestre em três formas distintas (REZENDE, 2020). Embora a radiação solar seja um fator determinante para a geração fotovoltaica, o rendimento dos módulos fotovoltaicos é influenciado pela temperatura da célula. Por isso, no que diz respeito à localização de usinas fotovoltaicas, o Brasil demonstra um potencial considerável. Segundo a edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, divulgada pelo INPE em 2017, os índices de irradiação solar em todo o território brasileiro, com base numa média diária anual, concentram-se na região Nordeste, seguida pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste.

3. ENERGIA EÓLICA

A capacidade instalada mundial de aerogeradores tem crescido exponencialmente, desde 1996. Em 2022, o Brasil ocupou a terceira posição no ranking global de nova capacidade instalada, com um total de 4,1 GW, perdendo apenas para a China e EUA, conforme Fig. 2 (ABEEÓLICA, 2022).

Tal como a energia solar, a energia eólica possui suas particularidades. Ao considerar que a velocidade do vento sofre alterações significativas em curtas distâncias, os procedimentos de avaliação para a instalação dos aerogeradores devem levar em conta parâmetros regionais que as influenciam (FRANCISCONI, 2022).

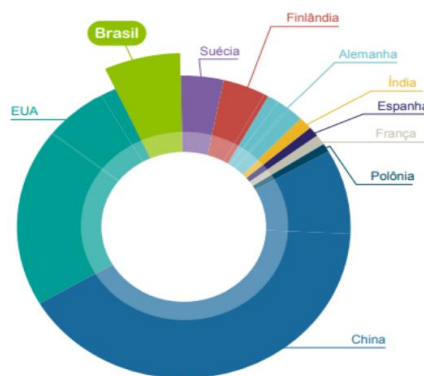


Figura 2 - Nova capacidade instalada em 2022.

4. ENERGIA HÍBRIDA

Segundo Francisconi (2022), a complementaridade energética é caracterizada pela habilidade de uma ou mais fontes se auxiliarem mutuamente ao longo do tempo e/ou espaço. Quando essas fontes têm a capacidade de se complementar, é possível minimizar interrupções no fornecimento aos consumidores e assim, diminuir os custos operacionais. Um gerenciamento eficiente dessas diversas fontes de energia, indica um aproveitamento ótimo da energia disponível e acumulada.

Segundo a EPE (2018), as usinas híbridas apresentam várias vantagens do qual, destaca-se a otimização das linhas de transmissão e distribuição. Para tanto, é necessário realizar um estudo preliminar para analisar a complementaridade entre diferentes fontes de geração, com o objetivo de alcançar uma maior eficiência. As fontes são caracterizadas por períodos de alta e baixa produtividade. A solar, por exemplo, opera com alta produtividade em horários próximos ao meio-dia, mas não consegue gerar energia durante à noite. Assim, a implementação de uma ou mais fontes pode auxiliar na correlação entre as fontes, reduzindo a desocupação das linhas de transmissão e garantindo uma geração contínua.

Além da conservação das linhas de transmissão, o sistema híbrido demonstra a capacidade de simplificar as futuras logísticas de operação e manutenção dos parques, bem como otimizar o espaço disponível e os equipamentos de geração. Este processo de produção, compartilha a área instalada e os dispositivos elétricos, o que torna um projeto viável devido à redução dos custos. Esta reorganização resulta em um aumento no fator de capacidade em certos horários (EPE, 2018).

5. METODOLOGIA

5.1 Locais de estudo

Para realizar o estudo da complementaridade entre as fontes eólica-fotovoltaica, buscou-se por áreas que mostrem um potencial de geração para ambas. Essa decisão foi baseada na escolha de quatro cidades na Bahia, com um potencial de energia eólica e solar relevante. Foi coletado os dados fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico ONS (2023) para obter informações sobre a geração e o fator de capacidade dos conjuntos de energia eólica e fotovoltaica. Vale destacar que cada conjunto pode incluir várias usinas na mesma cidade, o que aumenta a importância da análise.

Os detalhes sobre a localização e a potência nominal dos conjuntos de energia eólica e fotovoltaica selecionados, assim como as cidades envolvidas, estão na Tab. 1.

Tabela 1 - Lista dos conjuntos selecionados com seus respectivos dados

USINA	LATITUDE	LONGITUDE	NOME DA USINA	CIDADE	CAP. INST. MW
1	-13,316116	-43,46364	Conj. Fotovoltaico B JL	Bom Jesus da Lapa	40
2	-12,051321	-45,59781	Conj. Fotovoltaico Sertão Solar Barreiras	Barreiras	95
3	-11,592894	-41,315428	Conj. Eólico Morro do Chapéu Sul	Morro do Chapéu Sul	172
4	-12,309409	-42,342846	Conj. Eólico Brotas de Macaúbas	Brotas de Macaúbas	95,2

5.2 Análise dos dados de geração eólica e solar

Uma das avaliações realizadas neste estudo, envolve a análise da previsibilidade da produção de energia eólica e solar. Por meio de representações gráficas, é possível verificar se a média mensal de potência ao longo dos anos. E para atingir esse objetivo uma análise do perfil de potência baseada nas médias mensais durante os períodos em que os dados foram coletados, fez se necessário.

A análise matemática do comportamento da potência, seja ela eólica ou solar, foi calculada por meio do Coeficiente de Variação (CV), conforme apresentado na Eq. 1. O CV é uma ferramenta descritiva utilizada para interpretar a variação dos dados de maneira mais clara, no qual permite compreender a dispersão dos valores em relação à sua média. Os valores desses coeficientes, provenientes de vários conjuntos de dados, podem ser comparados para identificar quais conjuntos apresentam maior ou menor dispersão (DEVORE, 2006).

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (1)$$

em que:

S = Desvio padrão da amostra;

\bar{X} = média das observações da amostra

Quando o Coeficiente de Variação é baixo, isso sugere que o desvio padrão tem um impacto menor na média dos dados, essa variação, sendo é pequena, resulta em valores mais consistentes e uniformes. Em outras palavras, um CV menor sinaliza que os dados são mais homogêneos.

Outro aspecto avaliado na geração de energia eólica e solar é o Fator de Capacidade (FC), expresso na Eq. 2. Este parâmetro permite comparar a geração de energia entre todos os conjuntos, independentemente das diferenças de potência entre eles. Além disso, o FC auxilia na identificação dos meses com maior produção de energia.

$$FC = \frac{E}{P_{instalada}t} \quad (2)$$

em que:

E = Energia gerada durante um intervalo de tempo;

t = Tempo em que a energia é gerada;
 $P_{instalada}$ = Potência instalada.

5.3 Complementaridade horária

Com análise da complementaridade horária, foi utilizada dados estatísticos, mediante o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, apresentado na Eq. 3, em que x e y representam os dados de potência horária dos conjuntos eólico e solar, respectivamente, foi possível observar o momento da complementaridade entre as fontes. O coeficiente tende a variar de -1,0 a 1,0 em que valor negativo sugere essa complementaridade (DEVORE, 2006).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

em que:

x_i = observações da primeira amostra;
 \bar{x} = média das observações da amostra;
 y_i = observações da primeira amostra;
 \bar{y} = média das observações da amostra.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise dos dados da usina eólica

Diante dos dados coletados da ONS, e previamente tratados, deu-se início a avaliação da capacidade de previsão do sistema de energia eólica, explorando se existe um padrão de produção que se repete ao longo do tempo. Para determinar se a geração de energia deste sistema pode ser antecipada com base em padrões previamente observados, utilizou as médias mensais de potência de dois parques eólicos. Essas médias estão apresentadas na Fig. 3, demonstrando a flutuação na produção de energia durante um intervalo de três anos, de 2020 a 2022.

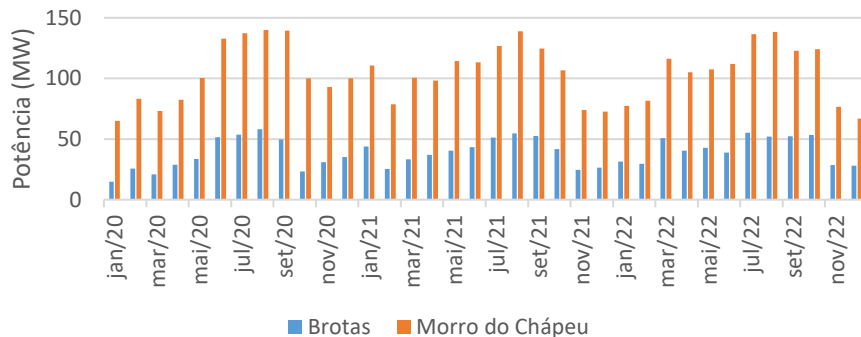


Figura 3- Potência média mensal eólica dos conjuntos eólicos para o período de 2020 a 2022.

Ao observar a Fig. 3 a potência eólica exibe um comportamento consistente ao longo dos anos para os dois conjuntos. No conjunto de Brotas, há um aumento na geração de energia elétrica no meio do ano, especificamente entre os meses de maio a setembro. Por outro lado, há uma redução na produção de energia nos primeiros meses de cada ano. O mês de setembro, no entanto, apresentou uma variação nos dados, no qual nos 2020 e 2021 registrou uma nos valores de potência, enquanto em 2022, o mesmo período apresentou um valor menor.

No conjunto de Morro do Chapéu, os dados são semelhantes ao do conjunto de brotas, com uma alta geração nos meses de maio a setembro e redução nos meses iniciais.

Além das análises gráficas, foi analisado o coeficiente de variação que estão apresentados na Tab. 2. Para cada mês, ao longo de um período de três anos, o CV foi computado e observado uma variação mínima nos dados. Na usina de Brotas, os meses de janeiro, março e outubro apresentaram uma dispersão de dados significativa em comparação a outros meses. Por outro lado, a usina de Morro do Chapéu teve variações menores, se comparado a usina de Brotas.

Tabela 2 - Coeficiente de variação para as potências eólicas entre os anos de 2020 a 2022

MÊS	CV DE BROTAS	CV DE MORRO
Janeiro	0,486	0,280
Fevereiro	0,087	0,028
Março	0,426	0,225
Abril	0,171	0,123
Maio	0,122	0,065
Junho	0,141	0,098
Julho	0,037	0,044
Agosto	0,055	0,006
Setembro	0,033	0,071
Outubro	0,383	0,113
Novembro	0,117	0,126
Dezembro	0,154	0,222

Entretanto, no conjunto de Brotas, os meses de junho a dezembro (exceto outubro) e fevereiro, apresentaram o menor CV, com valores iguais ou inferiores a 0,15. Essa uniformidade nos dados, indica que a potência se manteve relativamente estável durante esses meses. Para o conjunto de Morro, os dados mostraram uniformidade nos meses de maio a setembro. Essa estabilidade é um indicativo de consistência nos dados coletados, o que é um fator para futuras análises.

A Fig. 4 ilustra a alteração do FC médio anual dos conjuntos eólicos, com base nos dados coletados durante um período de três anos.

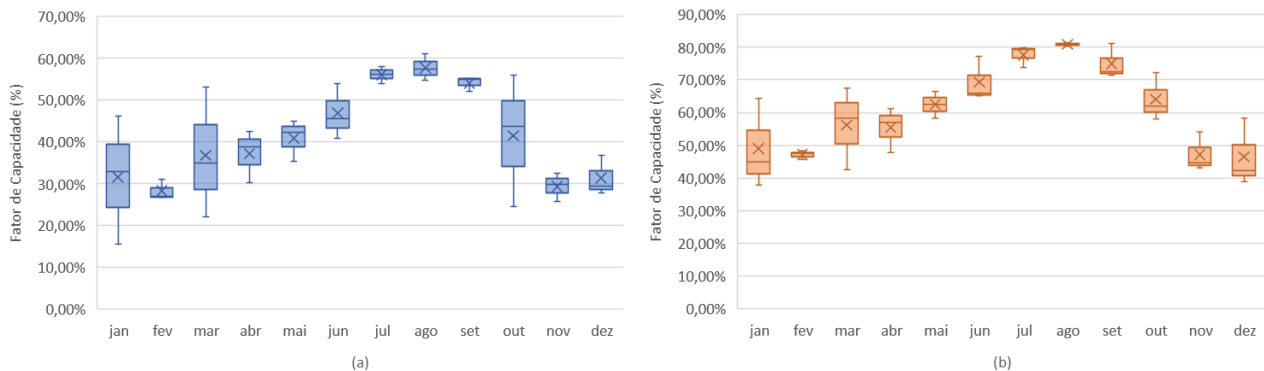


Figura 4 - Fator de capacidade média anual. Em (a) conjunto Brota de Macaúbas. Em (b) conjunto Morro do Chapéu.

Segundo a Fig. 4, o coeficiente de variação apresenta um padrão para ambos conjuntos. Em Brotas de Macaúbas, durante os meses de janeiro, março e outubro, nota-se a uma maior flutuação no fator de capacidade no agrupamento eólico, oscilando aproximadamente de 15% a 55%. No agrupamento do Morro do Chapéu, assim como em Brotas, a flutuação é mais acentuada nos meses de janeiro e março. Esta constatação corrobora os resultados apresentados no coeficiente de variação da Tab. 2.

Por outro lado, os meses que exibiram a menor flutuação e o maior fator de capacidade, foi observado nos cálculos do CV, para ambos os agrupamentos, foram julho, agosto e setembro. Nestes meses, o fator de capacidade atingiu quase 60% em Brotas e 80% em Morro. Desta maneira, durante esses meses o agrupamento eólico operou com uma eficiência consideravelmente alta, o que pode ter implicações significativas para a gestão e planejamento da produção da energia eólica. Para as duas usinas, fevereiro foi outro mês que apresentou uma pequena variação, no entanto, exibe um fator de capacidade baixo.

O conjunto em estudo exibiu uma consistência comportamental ao longo dos anos, evidenciando uma uniformidade nos dados de junho a setembro. Contudo, uma dispersão maior é notada nos meses de janeiro, abril e outubro, sinalizando uma variação considerável nesses períodos. Os resultados obtidos fornecem informações sobre a produção de energia eólica na região, indicando que a fonte tende a ter um desempenho mais propício de junho a agosto, possivelmente devido à influência dos ventos de maior velocidade que são típicos desses meses.

6.2 Análise dos dados da usina fotovoltaica

Para avaliar a habilidade de analisar a produção do sistema de energia fotovoltaica, foi investigado se há um padrão de produção que se repete ao longo do tempo. O propósito foi verificar se a geração de energia desse sistema pode ser prevista com base em padrões anteriormente observados. Para isso, as médias mensais de potência de dois parques fotovoltaicos foram examinadas. Essas médias são apresentadas na Fig. 5, mostrando a variação na produção de energia durante um período de três anos, de 2020 a 2022.

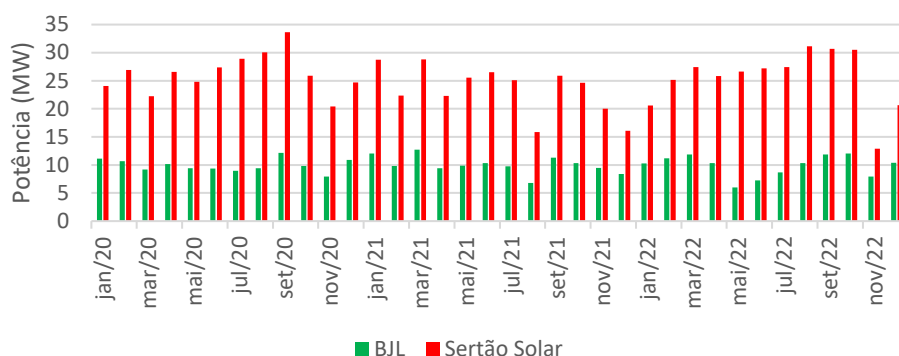


Figura 5 - Potência média mensal dos conjuntos Fotovoltaicos para o período de 2020 a 2022.

A Fig. 5 mostra que a potência solar fotovoltaica é consistente ao longo dos anos. No conjunto B JL, há um aumento na geração de energia nos meses de setembro e março, e uma redução nos meses intermediários de maio a agosto. Os anos de 2020 e 2022 apresentam padrões mensais semelhantes, enquanto 2021 difere um pouco, mas mantém um perfil parecido. De maio a julho de 2021, a produção foi maior, embora ainda fosse baixa para aquele ano. A dispersão dos dados de 2020 indicam uma variabilidade na produção de energia solar, possivelmente influenciada por vários fatores.

No conjunto Sertão Solar, assim como na usina B JL, observa-se uma maior produção de energia nos meses de agosto, setembro e março, e uma redução da geração nos meses intermediários. Embora o ano de 2021 apresente algumas diferenças em relação aos outros períodos para este conjunto, ainda assim, segue o mesmo padrão de redução da geração nos meses intermediários e aumento em agosto e setembro.

Para além das análises gráficas foi possível examinar o coeficiente de variação, foi calculado para cada mês, durante o período de três anos, apresentado na Tab. 3.

Tabela 3 - Coeficiente de variação para as potências eólicas entre os anos de 2020 a 2022.

MÊS	CV DE B JL	CV DE SERTÃO SOLAR
Janeiro	0,081	0,167
Fevereiro	0,068	0,092
Março	0,164	0,132
Abril	0,048	0,091
Maio	0,254	0,036
Junho	0,175	0,017
Julho	0,062	0,071
Agosto	0,209	0,332
Setembro	0,036	0,130
Outubro	0,107	0,114
Novembro	0,102	0,239
Dezembro	0,135	0,211

Para o conjunto B JL, o coeficiente de variação atingiu valores próximos a 0,25, nos meses de maio e agosto, sugerindo uma dispersão média da potência. Março, junho e outubro apresentaram dispersão dos dados, indicando pequena variabilidade na potência. Em contraste, os meses de julho a dezembro (exceto agosto), janeiro e fevereiro, exibiram o menor CV, com valores até 0,13.

Para o conjunto Sertão Solar, o mês de agosto apresentou maior CV, demonstrando uma dispersão considerável e nos meses de novembro e dezembro apresentaram dispersão menor. Nos demais meses os dados foram homogêneos, significando uma pequena variação. No geral, essa análise indica a uniformidade nos dados, sugerindo que a potência se manteve relativamente contínua durante esses meses.

A Fig. 6 apresenta a alteração do FC médio anual dos conjuntos fotovoltaicos, com base nos dados coletados durante um período de três anos, o que é possível observar o padrão proposto pelo coeficiente de variação.

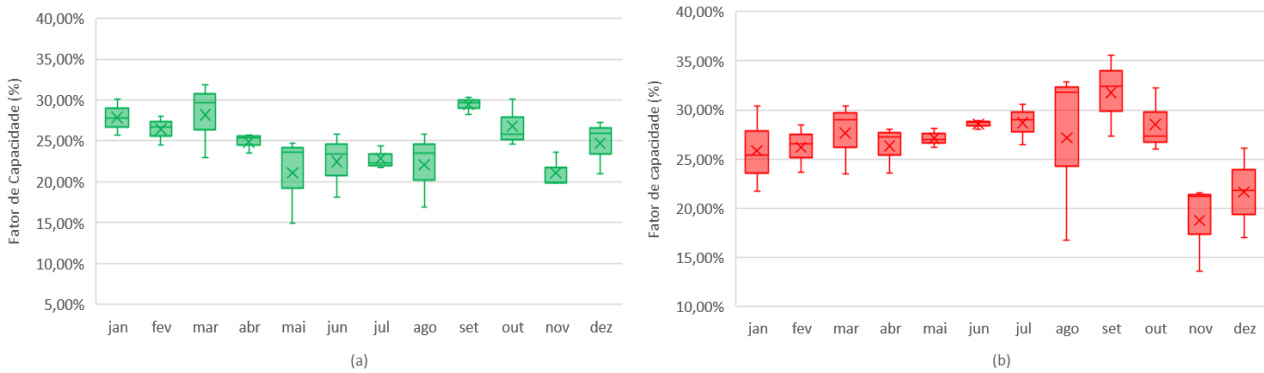


Figura 6 - Fator de capacidade médio anual. Em (a) conjunto BJJ. Em (b) conjunto Sertão Solar Barreiras.

Durante os meses de março, maio, junho e agosto, é possível observar uma maior oscilação no fator de capacidade para o conjunto fotovoltaico solar BJJ, variando aproximadamente de 15% a 31%. Esta constatação reforça os resultados apresentados no coeficiente de variação da Tab. 3. Em contrapartida, o mês de setembro demonstrou a menor flutuação e o maior fator de capacidade, cujo valor foi próximo de 30%. Os meses de março e outubro, possuem um FC elevado, porém são variáveis ao longo dos anos, o que demonstra que o conjunto operou com uma eficiência.

No conjunto Sertão Solar, a flutuação do FC nos meses de agosto, novembro e dezembro, além de que nos meses de agosto a outubro apresentaram a maior geração, e de março a junho, menor geração. De maneira análoga foi observado no conjunto BJJ.

Os conjuntos analisados demonstraram uma consistência em seu comportamento ao longo dos três anos. Todavia, há uma maior dispersão no mês de agosto, indicando uma variação durante o período. Os resultados observados fornecem informações sobre a produção de energia fotovoltaica na região.

6.3 Análise gráfica e cálculo do CCP.

Pela análise gráfica, foi verificado os períodos de pico e de baixa produção durante um dia médio de cada mês, integrando os dois conjuntos eólicos com os dois conjuntos fotovoltaicos. A Fig. 7 retrata a curva da média diária de potência dos conjuntos eólico e fotovoltaicos que foram alvo de estudo na Bahia, durante o decorrer do ano de 2022.

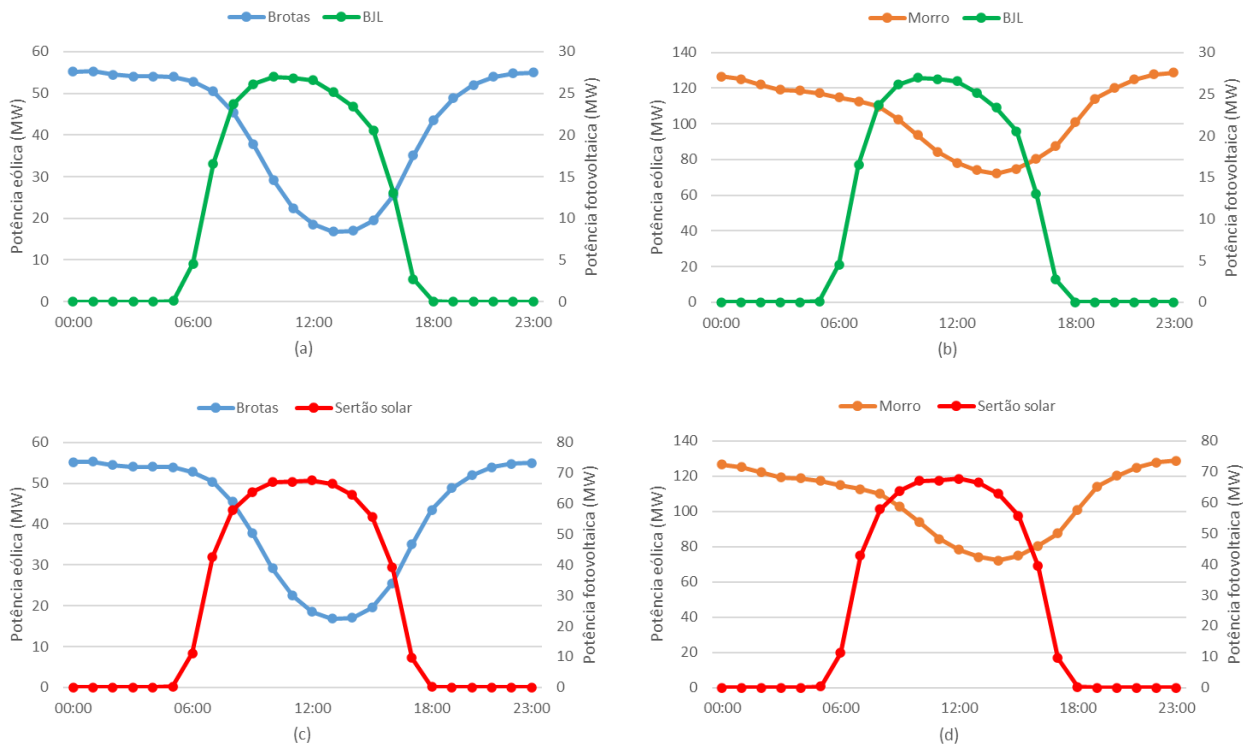


Figura 7 - Comparação dos conjuntos eólico e o fotovoltaico para o ano de 2022. Em (a) Brotas x BJJ. Em (b) Morro X BJJ. Em (c) Brotas X Sertão Solar. Em (d) Morro X Sertão Solar.

Foi observado na geração de energia eólica que existe uma queda na produção de energia durante o intervalo de tempo compreendido entre as 10h e as 18h. Este fenômeno indica que a eficácia da geração de energia eólica pode ser comprometida durante este período específico do dia.

Ao examinar a potência dos sistemas fotovoltaicos, foi apresentado um comportamento semelhante, abrangendo uma ampla área da baixa geração eólica para todas as quatro situações. Visualmente, há uma tendência de complementaridade entre as duas fontes nas quatro regiões estudadas, ou seja, há uma interação correlacional entre a geração de energia eólica e fotovoltaica, maximizando a eficiência da produção de energia. Os coeficientes de correlação de Pearson calculados para os conjuntos estão apresentados na Tab. 4.

Tabela 4 - Coeficientes de correlação de Pearson calculados no ano de 2022.

MÊS	BJL X BROTAS	BJL X MORRO	SERTÃO SOLAR X BROTAS	SERTÃO SOLAR X MORRO
Janeiro	-0,809	-0,825	-0,832	-0,846
Fevereiro	-0,764	-0,795	-0,809	-0,831
Março	-0,864	-0,797	-0,898	-0,840
Abril	-0,885	-0,702	-0,913	-0,751
Maio	-0,843	-0,680	-0,858	-0,719
Junho	-0,801	-0,659	-0,803	-0,668
Julho	-0,812	-0,427	-0,821	-0,462
Agosto	-0,805	-0,670	-0,797	-0,681
Setembro	-0,817	-0,820	-0,826	-0,830
Outubro	-0,740	-0,709	-0,796	-0,766
Novembro	-0,672	-0,700	-0,789	-0,800
Dezembro	-0,770	-0,736	-0,819	-0,791
Média	-0,798	-0,710	-0,830	-0,749

Os coeficientes mensais se manifestam como valores negativos em todos os meses para todas as correlações. Este valor negativo simboliza uma associação que as fontes de energia são inversamente proporcionais. Esta observação está em consonância com as expectativas, uma vez que a curva de geração do sistema fotovoltaico exibe um formato que cobre a maior parte do período de baixa geração eólica.

Os valores dos coeficientes de correlação que foram encontrados na Tab. 4 estão em consonância com o gráfico da Fig. 7. A faixa dos valores do conjunto BJJL combinado com Brotas de Macaúbas, apresenta combinações que se encontra entre -0,7 e -0,8, indicando uma grande correlação entre as duas fontes de energia em questão. Para a correlação do conjunto BJJL com Morro do Chapéu, pode-se verificar que a maioria dos meses exibem valores entre -0,6 a 0,8, com o mês de julho apresentando o menor valor de -0,43. Na correlação da usina de Sertão solar com Brotas de Macaúbas, os valores variam entre -0,7 a 0,9, apresentando a maior correlação entre os casos estudados. E por fim, a combinação do conjunto Sertão Solar com Morro do Chapéu apresentou variação entre -0,7 a -0,8, assim como a análise do conjunto BJJL com Morro do Chapéu. As médias das correlações mensais, estão entre -0,7 a -0,8. Esse valor é um indicativo claro de uma alta correlação. Portanto, pode-se concluir que existe uma relação significativa e consistente entre as duas fontes de energia ao longo do tempo, mesmo que seja em diferentes regiões da Bahia.

7. CONCLUSÃO

Com base nas avaliações analisadas, foi possível inferir que a produção de energia eólica mesmo com um perfil variável, apresentou um fator de capacidade contínuo, dentro de um intervalo de 15% a 80%. É interessante notar que os valores foram mais elevados nos meses de julho, agosto e setembro, enquanto foram mais baixos nos meses extremos do ano.

A produção de energia fotovoltaica também demonstrou um perfil de geração mensal semelhante, no qual se repetiu ao longo dos três anos, o que apresenta sugere uma certa previsibilidade na produção de energia a partir desta fonte. O fator de capacidade dos conjuntos fotovoltaicos não apresentou uma dispersão significativa, indicando uma consistência na eficiência dessas usinas. As médias mantiveram-se próximas e estiveram entre valores de 13% e 35% nos conjuntos fotovoltaicos.

No que diz respeito aos cálculos dos Coeficientes de Correlação de Pearson, foi obtida uma associação negativa entre todas as regiões estudadas. Esta associação indica uma complementaridade entre as fontes de energia eólica e fotovoltaica, no qual foram encontrados mensalmente entre -0,7 e -0,8. Este intervalo representa uma interessante correlação inversa, o que proporciona uma alternância das gerações. Esta característica é importante, pois permite que as duas fontes de energia se complementem, garantindo uma geração de energia mais estável e confiável.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Oeste da Bahia, ao grupo GPSEE e ao CNPQ por fomentar a pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. Dados abeeólicos. boletim anual. São Paulo, SP, 2023.
- DAGOSTIN, C. S. Estimativa da distribuição espectral da radiação solar para conversão fotovoltaica em porto alegre. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), UFRGS. Porto Alegre, RS, 2021.
- DEVORE, JL Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. 6ª edição. Cengage Aprendizado. São Paulo, SP, 2006.
- EPE, E. d. P. E. Avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas: Proposta metodológica e estudos de caso. Brasília, DF, 2017
- EPE, E. d. PE Usinas híbridas: uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento. Brasília, DF, 2018
- EPE, E. d. P. E. Balanço energético 2022: Ano base 2021. Rio de Janeiro, RJ, 2022a.
- EPE, E. d. P. E. Plano decenal de energia 2032. Brasília, DF, 2022b.
- FRANCISCONI, LFT Estudo de complementaridade energética de usina híbrida eólica e fotovoltaica entre uma cidade na Bahia e uma no rio grande do sul. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), UTFPR, Medianeira, PR, 2022
- MONTEIRO, A. L. Análise de viabilidade econômica de um sistema híbrido de energia renovável (eólico-solar) na ilha do mel. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), UTFPR. Curitiba, PR, 2018.
- ONS, O. N. d. S. E. Resultados da operação. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>>. Acesso em: 08 de novembro de 2023, 20:30
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- RELVA, S. G. Método de caracterização da irradiação para geração fotovoltaica: uma análise sistêmica da modelagem da energia primária. Dissertação (Mestrado em Ciências), USP. São Paulo, SP, 2017.
- REZENDE, B. R. M. Complementaridade entre fontes renováveis através da análise de componentes principais. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia) UFF, Volta Redonda, RJ, 2020.
- SECRETARIA DE ENERGIA, Atlas eólico do estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 2022.

ANALYSIS OF GENERATION COMPLEMENTARITY WIND AND PHOTOVOLTAIC IN BAHIA

Abstract. *One of the challenges in the use of renewable energy is the lack of forecasting of natural resources that only produce in favorable environmental conditions. One solution to this problem is the combination of renewable sources, in such a way that generations tend to increase, generating a favorable outcome during the year. But to do this, it is necessary to analyze the sources in order to find systems that complement each other efficiently. Considering the growth of wind and photovoltaic plants, this study focuses on analyzing the correlation of the two energy sources in view of the characteristics that are related both in monthly and hourly terms. Furthermore, it becomes necessary to visualize the fluctuations of these sources throughout the day and year. Real power and capacity factor data from two wind farms and two photovoltaic farms were collected jointly from the National Electric System Operator (ONS) during the period from 2020 to 2022, namely B JL Solar, Sertão Solar Barreiras, Brotas de Macaúbas and Morro do Chapéu Sul. The analyzes are composed of two stages, the first of which aims to visualize the wind and photovoltaic generation profile throughout the period of data collected and the second analyzes the hourly complementarity between the sources through graphs and statistical calculations such as the Person Correlation Coefficient (CCP). The calculations indicated a negative association between the sets, suggesting complementarity between wind and photovoltaic energies. The monthly CCPs ranged from -0.7 to -0.8, demonstrating parallelism, in which the increase in generation from one source results in the attenuation of the other, ultimately obtaining more stable and reliable energy generation.*

Keywords: *Complementarity, Photovoltaic, Wind.*